



University of Groningen

Strenght and stiffness of high-pressure hoses

Teerling, Harm Lute Jakob

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1994

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Teerling, H. L. J. (1994). Strenght and stiffness of high-pressure hoses. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting

Sterkte en stijfheid van hogedrukslangen

In de geschiedenis van de mens is altijd vraag geweest naar transportmogelijkheden van vloeistoffen. Voor dit doel zijn er in de loop van de tijd diverse systemen ontwikkeld. Sommige van deze zijn verder ontwikkeld tot systemen die tot op de dag van vandaag in gebruik zijn. De moderne techniek kan eenvoudigweg niet buiten slangen.

Dit proefschrift is gewijd aan de zogenaamde hogedrukslang. Dit soort slang wordt voornamelijk gebruikt om kracht te transporteren en bevat meestal een vloeistof onder hoge druk. Onder normale omstandigheden zijn drukken tot 450 bar gebruikelijk, echter voor specifieke toepassingen worden zelfs drukken tot 4000 bar toegepast.

De algemene opbouw van een cilindrische hogedrukslang is als volgt. Van binnen uit naar buiten gezien hebben we allereerst een binnenste rubberen buis, vervolgens één of meerdere zogenaamde wapeningslagen bestaande uit draden met een hoge axiale treksterkte en als laatste weer een rubberen buis. In het geval dat de slang meerdere wapeningslagen bevat, zijn deze lagen gescheiden door rubberen tussenlagen. Het is duidelijk dat een hogedrukslang zijn sterkte hoofdzakelijk ontleent aan de draden in de wapeningslagen, terwijl de flexibiliteit een gevolg is van het gebruik van zacht-rubberen tussenlagen en de kinematische mogelijkheid van de draden (hetzij gespiraliseerd, hetzij gevlochten, waarover later meer) om een soort schaarbeweging uit te voeren. De functie van de binnenste rubberlaag is tweeledig. Ten eerste verhindert deze het lekken van vloeistof door de wand van de slang en ten tweede verdeelt deze laag de interne druk gelijkmatig over de binnenste wapeningslaag. De functie van de eventueel aanwezige tussenlagen is het overbrengen van de interne druk naar de verder naar buiten gelegen wapeningslagen. De buitenste rubberlaag is aangebracht om de slang te beschermen tegen chemische en mechanische invloeden van de omgeving.

Het doel van dit proefschrift is het presenteren van berekeningsmodellen voor het bepalen van de sterkte en de stijfheid van hogedrukslangen onder invloed van een statische inwendige druk q die een belasting van de slang oplevert in zowel de axiale als de radiale richting. Twee effecten kunnen er verantwoordelijk voor zijn dat de slang zijn sterkte verliest. In de eerste plaats noemen we de breuk van de draden in de wapeningslagen. De tweede oorzaak is de zogenaamde kruip van de rubber. Dit houdt in dat de inwendige druk de rubber door de openingen in de wapeningslagen perst. In verband met de sterkte van een slang hanteert men het begrip barstdruk: de inwendige druk waarbij de slang defect raakt door één der bovengenoemde effecten. Het is duidelijk dat een evenredige verdeling van de uitwendige belasting over de verschillende wapeningslagen een maximale barstdruk oplevert. Natuurlijk heeft ook de dekkingsfactor (gedeelte van de oppervlakte van een wapeningslaag dat bedekt is door staaldraden) effect op de barstdruk, een grotere dekkingsfactor heeft een grotere barstdruk tot gevolg.

Samenvattend merken we op dat een hogedrukslang eigenlijk moet voldoen aan twee, min of meer tegenstrijdige, eisen, te weten een grote sterkte en een grote flexibiliteit.

Daarbij wordt het dan nog op prijs gesteld als de axiale verlenging, de radiale verplaatsing en de torsie in de slang minimaal zijn.

In dit proefschrift beschouwen we zowel rechte slangen als slangen die zich in een gebogen toestand bevinden. Wat betreft berekeningsmethoden voor gebogen slangen betreden we in dit proefschrift onontgonnen gebied: er was geen literatuur te vinden met als onderwerp calculatiemodellen voor hogedrukslangen in gebogen toestand. In het onderzoek vestigen we onze aandacht vooral op, enerzijds de interne obstructie in een wapeningslaag, en anderzijds de elliptische vorm van de dwarsdoorsnede van een vervormde gebogen slang. De interne obstructie, hetzij in een wapeningslaag (in het geval van een gevlochten laag), hetzij tussen twee wapeningslagen (in het geval van gespiraliseerde lagen), beschouwen we voor zowel de gebogen als de rechte slang. De vorm van de dwarsdoorsnede wordt uiteraard alleen onderzocht bij een gebogen slang.

Als we alleen de wapeningslagen beschouwen in een hogedrukslang, kunnen we de volgende meest gebruikte onderverdeling maken:

- Slangen waarin elke wapeningslaag een vlecht is van staaldraden, die een zeer hoge treksterkte hebben. Elke vlecht in dit type slang is samengesteld uit twee families van linten, die elk zes tot twaalf draden bevatten. De linten lopen spiraalsgewijs over het oppervlak van de rubber cilindres. De twee families van linten zijn onderling verweven in een regelmatig en symmetrisch patroon, één familie linksom en de ander rechtsom. In het geval dat de slang meer dan één vlecht bevat, zijn deze onderling gescheiden door rubberlagen.
- Slangen waarin elke wapeningslaag bestaat uit losse spiralen. In dit geval bestaan de draden uit staal, twaron, rayon, nylon, polyester, linnen of katoen. In deze zogenaamde spiraalslangen bestaat elke wapeningslaag uit één familie van draden die op een cilindrisch oppervlak gewonden zijn langs spiraalvormige lijnen. Ze lopen afwisselend linksom en rechtsom. Deze constructie wordt gekozen om de torsie van de slang te minimaliseren.

De meerderheid van de hogedrukslangen behoort tot een van beide groepen, er zijn echter specifieke toepassingen waarbij slangen worden gebruikt die zowel spiraal- als gevlochten wapeningen bevatten. We merken op dat de toepassing van kunstvezels (met uitzonderlijk hoge treksterkte) in de wapeningslagen tot dusverre beperkt is gebleven tot spiraalslangen.

En belangrijke grootte die we hier nog willen noemen is de zogenaamde kritieke of neutrale spoedhoek Φ_c . Dit is die vlechthoek van de wapeningslaag in een slang met één vlecht waarbij de slang geen verandering vertoont, noch in axiale lengte, noch in diameter, aangenomen dat de draadjes zelf onrekbaar zijn. Als we een rechte slang beschouwen met één versterkingslaag, observeren we het volgende. Indien de spoedhoek kleiner is dan de kritieke hoek zal de slang een verlenging vertonen, terwijl de diameter kleiner wordt na het aanbrengen van een interne druk. In het geval dat de spoedhoek groter is dan de kritieke hoek treedt het tegengestelde effect op. De slang vertoont een verkorting terwijl de diameter groter wordt.

In hoofdstuk 2 presenteren we een model voor een flexibele spiraalslang waarin de wapening bestaat uit een aantal gespiraliseerde draden. We beschouwen een slang in

rechte toestand, waarbij de binnenste rubberlaag radiaal en axiaal belast wordt door een interne druk. De slang is in staat vrij te bewegen in zowel axiale als in radiale richting. Gebruik makend van het principe van de minimale potentiële energie geven we hier een approximatieve analyse van de in de rubber en de staallagen optredende rekken en de spanningen. Met behulp van gegevens verkregen uit experimenten bij Trelleborg B.V., Hoogezand was het mogelijk een schatting te maken voor enkele onbekende parameters geïntroduceerd in het berekeningsmodel.

We vermelden de volgende resultaten. Het blijkt dat de kinematische grootheden ΔL (axiale verlenging), β (torsie hoek), u_i (radiale verplaatsing in de verschillende wapeningslagen) en φ_i (de spoedhoeken in de verschillende wapeningslagen) op een niet-lineaire wijze afhankelijk zijn van de inwendige druk. Bij toeneming daarvan vertoont de slang allereerst een axiale verkorting, waarna na het bereiken van een minimale waarde een verlenging volgt. De absolute waarden van de spoedhoeken dalen en lijken bij verder stijgende druk asymptotisch naar constante waarden te gaan. We zijn geneigd dit effect toe te schrijven aan de mogelijkheid dat de draden in de wapeningslagen in de begintoeestand nog niet hun optimale ligging hebben om een zo groot mogelijk deel van de belasting op te nemen. Bij toenemende druk "passen de spoedhoeken zich aan" bij de toegepaste belasting. Als de druk dan nog verder stijgt hebben we alleen nog te maken met een axiale rek ten gevolg van de elastische uitrekking van de draden, terwijl de stand van de draden ten naaste bij constant blijft. In tegenstelling met de hierboven genoemde grootheden vertonen de rekken en de spanningen in de draden van begin af aan een bij benadering lineair gedrag.

Hoofdstuk 3 is gewijd aan een flexibele hogedrukslang met twee, drie en vier vlechten. We beschouwen een slang in een rechte toestand, waarbij de interne druk op de binnenste rubberlaag wederom een radiale en axiale belastingstoestand oplevert. Deze belasting wordt weer voor het grootste deel opgenomen door de vlechten en opnieuw geldt dat een zo evenredig mogelijke verdeling van deze belasting over de verschillende vlechten de sterkte van de slang ten goede komt. In dit hoofdstuk geven we aan hoe we dit door een goede keuze van de spoedhoeken kunnen bereiken. Het bleek noodzakelijk te zijn om rekening te houden met niet-lineaire effecten van geometrische aard, terwijl we wel lineaire materiaalwetten hebben toegepast. Door het invoeren van fictieve rotatieveren tussen de draden in de twee families van draden in één vlecht hebben we geprobeerd het effect van de onderlinge wederzijdse obstructie van de beide families in één vlechtlaag in rekening te brengen.

Hier vermelden we een paar van de resultaten. Zoals slangconstructeurs allang empirisch hebben bepaald voor een slang met twee wapeningslagen, blijkt ook uit onze berekeningen dat het hiertoe nodig is de spoedhoeken Φ_1 en Φ_2 zodanig te kiezen dat of $\Phi_1 < \Phi_c < \Phi_2$ of $\Phi_1 > \Phi_c > \Phi_2$. Wordt niet aan deze conditie voldaan, dan is het niet mogelijk de belasting evenredig over de wapeningslagen te verdelen. In het geval dat de slang meer dan twee wapeningslagen bevat is het niet zo eenvoudig een relatie aan te geven waaraan de spoedhoeken moeten voldoen. In onze berekeningen bleek dat hoe dichter de spoedhoeken de kritieke spoedhoek naderen, hoe moeilijker het door ons toegepaste numerieke proces het krijgt een stabiele oplossing te vinden. Wat betreft de onderlinge obstructie tussen twee families van draden in een vlecht blijkt dat ons mechanisme van de fictieve rotatie veren goed werkt. Voor een toenemende veerconstante geeft de slang

een kleinere axiale verlenging of verkorting te zien bij een stijgende druk q .

In hoofdstuk 4 beschouwen we een hogedrukslang met gevlochten wapeningslagen in gebogen toestand onder de invloed van een interne druk. Het moge duidelijk zijn dat in dit geval de analyse veel ingewikkelder is dan die in de voorgaande hoofdstukken. We hebben in dit geval geen omtrekssymmetrie meer, maar alleen een symmetrie ten opzichte van het vlak waarin de slang wordt gebogen. Dit houdt in dat we nu meerdere onafhankelijke variabelen moeten introduceren om de deformatie te beschrijven. Door een simpel calculatiemodel te kiezen waarbij de deformatie constant blijft langs de gebogen as van de slang, hebben we het aantal onafhankelijke parameters beperkt tot twee: één in de radiale richting en één in de omtreksrichting in een doorsnede van de slang. Hierna werd met behulp van het principe van de minimale potentiële energie een approximatie voor de rekken en de spanningen in zowel de staaldraden als de rubberlagen bepaald. Ook hier hebben we weer de fictieve rotatieveren gebruikt om de onderlinge belemmering van de draadjes te simuleren. In het model hebben we verder een poging gedaan om de dikte van de wapeningslagen in de berekening mee te nemen.

Het zou te ver voeren om hier alle resultaten te bespreken, daarom geven we hier zeer in het kort een samenvatting van een paar van onze bevindingen. Al snel werd duidelijk dat in sommige gevallen de lineaire betrekking, die we hadden gebruikt in de voorgaande hoofdstukken, bij de simulatie van de obstructie in de wapeningslagen niet zo goed voldoet in het geval van een gebogen slang. Na veel zoeken bleek een cubische relatie tussen de veerconstanten van de fictieve rotatieveren en de lokale dekkingsgraad (hoe groter de dekking, desto meer obstructie) te leiden tot betere overeenstemming met de uitkomsten van enkele door ons uitgevoerde experimenten.

Wat betreft de vorm van de doorsnede vonden we dat de oorspronkelijk cirkelvormige doorsnede van de slang na buiging elliptisch wordt, waarbij de lange as loodrecht staat op het vlak waarin de slang is gebogen. Zoals mag worden verwacht worden de rubberen tussenlagen aan de binnenkant van de bocht dikker terwijl de dikte aan de buitenkant afneemt. Een opvallend verschijnsel is dat in sommige gevallen zowel de lange als de korte as van de elliptische vorm kleiner zijn dan de overeenkomstige radii van de vlechten in de onvervormde slang.

94012385